

CARACTERIZAÇÃO DE BARRAS PULTRUDADAS REFORÇADAS COM FIBRAS DE VIDRO E GRAFENO

Oliveira, M.S.¹, Bueno, G.M.²

¹Universidade Federal do Rio Grande do Sul / Departamento de Engenharia de Materiais, Av. Bento Gonçalves, 9500, Bairro Agronomia, Porto Alegre - RS, CEP: 91501-970

²Universidade Federal do Rio Grande do Sul / Escola de Engenharia, Av. Osvaldo Aranha, 99, Bairro Centro, Porto Alegre – RS, CEP: 90035-190

E-mail: santana.matheus95@icloud.com

RESUMO

Os materiais compósitos vêm ganhando destaque na construção civil como alternativa aos materiais tradicionais. Dentre eles, as barras pultrudadas reforçadas com fibras de vidro, conhecidas por GFRP (*Glass Fiber Reinforced Polymer*) sobressaem-se pela alta resistência à tração. Além disso, a adição de grafeno aprimora as propriedades do polímero. Este trabalho objetivou em realizar a caracterização física, térmica e mecânica das barras de GFRP fabricadas com fibras de vidro, resina epóxi e grafeno. Para isso, foi determinada a densidade, o diâmetro efetivo e a fração mássica das barras de GFRP, além de determinar a temperatura de transição vítrea (T_g) através da análise de DMA (*Dynamic Mechanical Analysis*). O material divulgado apresentou diâmetro de 5,39 mm, densidade média de 1,94 g/cm³, teor mássico de fibras de 81,10%, e T_g de 111,28 °C. O ensaio de tração apresentou uma média de tensão de 904,44 MPa, confirmando a eficiência das barras de GFRP como reforço estrutural na construção civil.

Palavras-chave: GFRP, barras pultrudadas, nanotecnologia

INTRODUÇÃO

Os compósitos são geralmente desenvolvidos para aprimorar as propriedades dos materiais, combinando uma matriz com reforços para o desenvolvimento de um novo material. Além disso, a matriz pode ser de metal, cerâmica ou polímero (1).

A matriz polimérica é uma alternativa eficiente para as aplicações dos materiais compósitos, tendo a opção de usar resina termoplástica ou termorrígida, sendo que a resina termorrígida é mais usada por apresentar melhores propriedades, como por exemplo, maior resistência mecânica (2) comparadas com matrizes termoplásticas. As propriedades mecânicas dos materiais compósitos são em grande parte determinadas pelas propriedades das fibras, porém a resina polimérica absorve os esforços e transfere para cada uma das fibras individuais (3).

Os compósitos de polímero reforçado com fibras, conhecidos por FRP (*Fiber Reinforced Polymer*), vêm ganhando ampla aceitação mundial como um material de construção viável, pois as fibras junto com a matriz dão origem a um produto que apresenta propriedades superiores em comparação as propriedades individuais das fibras e resina. Dessa maneira, eles conquistaram um amplo campo de aplicação que abrange áreas da engenharia como a aeroespacial, a automobilística e a construção civil (4).

As resinas epóxis são frequentemente empregadas na fabricação de compósitos de alta performance, oferecendo notáveis capacidades mecânicas, resistência química e proteção contra ambientes adversos, além de propriedades elétricas aprimoradas e excelente desempenho em altas temperaturas. Sua adesão robusta ao substrato é outra vantagem significativa. No entanto, é importante notar que as resinas epóxi são pouco resistentes à exposição aos raios ultravioleta UV (5).

As fibras de vidro são amplamente utilizadas na fabricação de materiais compósitos devido à sua relação custo-benefício favorável. Os tipos mais comuns incluem o vidro E, vidro S e vidro AR. O vidro E é reconhecido pelo seu bom isolamento elétrico, resistência à umidade e elevada resistência mecânica. Enquanto isso, o vidro S oferece maior resistência à tração e módulo de elasticidade, apesar de ser mais caro, o que favorece a preferência pelo vidro E. Por outro lado, o vidro AR destaca-se pela sua resistência ao ataque de álcalis. Globalmente, as fibras de vidro exibem alta resistência à tração, mas mostram baixa resistência à compressão e ao cisalhamento (6);(7).

A interface entre as fibras de vidro e a matriz polimérica constitui uma zona de transição anisotrópica que demonstra uma variação gradativa de propriedades, facilitando a transferência de esforços mecânicos da matriz para as fibras. Além disso, é crucial que exista uma adequada compatibilidade química e física entre esses materiais. A estabilidade dessa interface ao longo da vida útil do compósito de FRP é de extrema importância, uma vez que uma adesão insuficiente entre as fases envolvidas pode desencadear falhas que comprometem significativamente o desempenho do compósito (7).

O grafeno é um componente promissor que está sendo incorporado a materiais compósitos poliméricos devido às suas excelentes propriedades mecânicas, destacando-se na aplicação em escala industrial. Este material

bidimensional consiste em uma camada atômica de átomos de carbono dispostos em uma matriz hexagonal. Este material apresenta característica flexível, transparente, resistente a produtos químicos, bactérias e vírus, e é termicamente estável (8). Além disso, a adição de nanopartículas de alta resistência e rigidez, como os GNPs (*Graphene Nanoplatelets*), tende a aprimorar as propriedades dos compósitos (9).

O processo de pultrusão, iniciado na década de 1950, é utilizado para a fabricação de barras, tubos e perfis retos com seção contínua com as mais diversas geometrias e formas. As barras de GFRP são produzidas tensionando-se inicialmente as fibras de vidro e impregnando-as com uma resina líquida na cuba de impregnação. Em seguida, o material é trançado e aquecido, ocorrendo a reticulação da resina polimérica, e, finalmente, é cortado no comprimento padrão desejado (10).

As barras de GFRP são classificadas de acordo com seu diâmetro nominal e área de seção transversal, conforme especificado na norma ASTM D7957-22. Suas características geométricas desempenham um papel crucial na aderência ao concreto, já que a tensão de aderência se desenvolve na camada exterior das barras. Particularmente, o tipo de acabamento superficial é de especial importância, podendo ser nervurada com fibras enroladas helicoidalmente, nervurada com fibras enroladas helicoidalmente e revestida com areia e nervurada com conformação na resina (11).

As propriedades das barras de GFRP possibilitam a aplicação em reparos, reabilitação e construção de novas obras de infraestrutura, especialmente em ambientes adversos. Isso se deve ao fato de que essas barras conferem à estrutura uma durabilidade prolongada (12). Além disso, as barras de GFRP possuem densidade que pode ser de três a sete vezes menor que a do aço, proporcionando maior economia devido à redução de peso, o que permite diminuir as dimensões de fundações, pilares, vigas e outros componentes, além de reduzir o peso próprio da estrutura. Por exemplo, a densidade das barras de GFRP varia entre 1,25 e 2,10 g/cm³, aproximadamente 25% da densidade das barras de aço (7,90 g/cm³). Isso resulta em custos reduzidos de transporte e facilita o manuseio, armazenamento e utilização no local da construção (10).

A temperatura de transição vítrea pode ser associada ao relaxamento estrutural do material, pois, acima dessa temperatura, a capacidade do polímero

de transferir tensões para as fibras de vidro é significativamente reduzida, impactando negativamente a resistência à tração das barras de GFRP (13).

No entanto, as barras de GFRP ainda enfrentam resistência por parte de alguns projetistas devido à sua ruptura brusca. Para contribuir com uma melhor compreensão dessas barras, este trabalho teve como objetivo realizar uma caracterização detalhada, utilizando uma abordagem quantitativa. Esses resultados visam comprovar a eficiência das barras de GFRP como material de reforço estrutural na construção civil.

MATERIAIS E MÉTODOS

A caracterização quantitativa incluiu a determinação da densidade, do diâmetro efetivo e fração mássica, bem como a avaliação das propriedades mecânicas, como a tensão de ruptura e o módulo de elasticidade, além das análises térmicas. Para a caracterização do compósito de fibras de vidro com matriz epóxi e grafeno, foram utilizadas barras com diâmetro nominal de 5 mm e conformação superficial *helically wrapped* produzidas pela empresa brasileira VerGraf.

Foram utilizadas três amostras com comprimento de 30 mm, cujas massas, tanto secas quanto imersas em água deionizada, foram medidas a uma temperatura de 23°C, com densidade da água de 997,54 kg/m³, conforme o Método A da norma ASTM D792-20, que utiliza a fórmula (A) para densidade relativa e (B) para densidade.

$$\text{sp gr } 23/23^{\circ}\text{C} = \frac{a}{a-b} \quad (\text{A})$$

$$D^{23^{\circ}\text{C}} = \text{sp gr } 23/23^{\circ}\text{C} \times 997,54 \quad (\text{B})$$

Onde: a = massa aparente da amostra seca, b = massa aparente da imersa no fluído.

O diâmetro efetivo das barras de GFRP foi determinado através das equações: (C) para o volume do exemplar, (D) para área efetiva e (E) para o diâmetro efetivo.

$$V = \frac{(a/1000)}{D} \quad (\text{C})$$

$$A_{\text{ef}} = \frac{V}{(C_{\text{med}}/1000)} \quad (\text{D})$$

$$\phi_{\text{ef}} = \frac{2 \sqrt{A_{\text{ef}}}}{\pi} \times 1000 \quad (\text{E})$$

Onde: V = volume do exemplar, D = densidade, A_{ef} = área efetiva, C_{med} = comprimento médio da amostra e O_{ef} = diâmetro efetivo.

Para determinar a fração mássica, foi utilizada a norma ASTM D3171-22, Anexo A.7. Foram utilizadas três amostras com comprimento de 30 mm, e cada uma foi pesada em uma balança analítica. Após isso, foi utilizada uma mufla da marca Sanchis, modelo BTT. A temperatura durante o ensaio foi mantida constante a 565 °C por 6 horas.

As análises térmicas iniciaram pela TGA. O equipamento utilizado foi do fabricante TA Instruments, modelo q50, onde a amostra foi submetida a um aquecimento de 20 °C a 750 °C, com uma taxa de aquecimento de 20 °C/min, de acordo com a norma ASTM D6370-99. As curvas DSC foram obtidas aquecendo as amostras de 25 a 250 °C, com uma taxa de aquecimento de 10 °C/min em conformidade a norma ASTM D3418-21. Para a análise de DMA, foi utilizado o equipamento da TA Instruments, modelo 2980, para uma amostra de 60 x 4,7 mm, conforme a norma ASTM 7028-07. O modo de flexão foi aplicado, com variação de temperatura de 25 °C a 200 °C. A taxa de aquecimento foi de 2 °C/min, com uma frequência de 1 Hz.

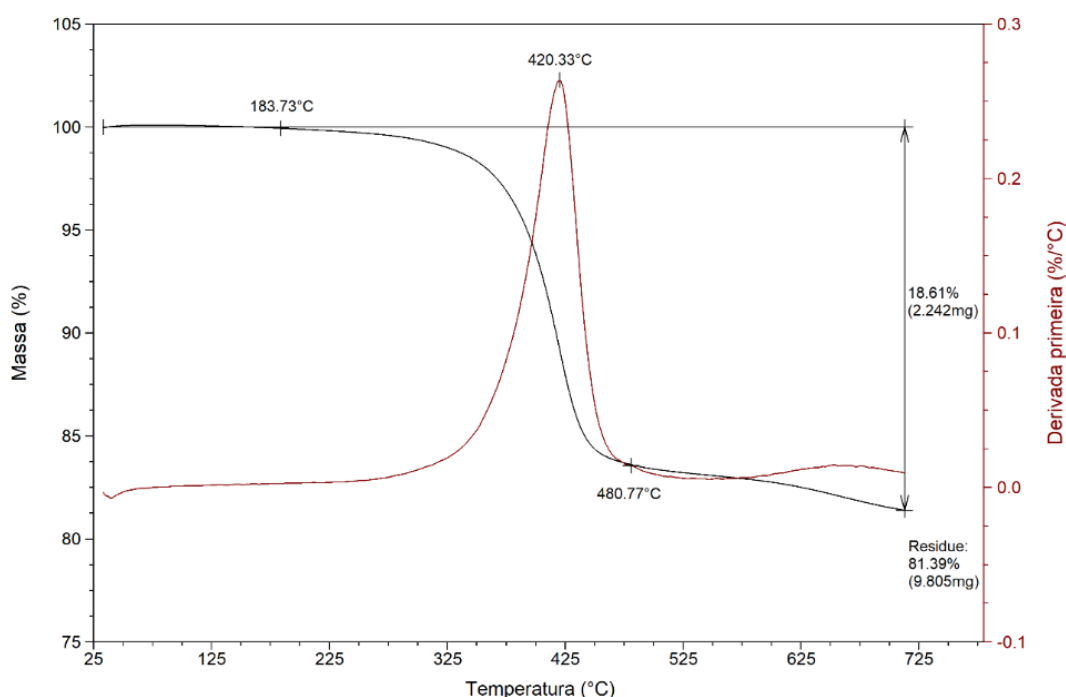
Para o ensaio de tração as amostras foram preparadas de acordo com a norma ASTM D7205-21. Foram utilizados 250 mm de tubo de aço schedule 40 nas extremidades das barras de fibras de vidro e um adesivo estrutural a base epóxi para aderir as barras de GFRP ao tubo de aço e as amostras foram alinhadas em um gabarito de madeira, conforme orientado na norma. O ensaio foi realizado em uma máquina universal da marca Shimadzu, modelo AGX-PLUS, com capacidade máxima de 250 kN. Conforme determinado pela norma ASTM D7957-22, o ensaio foi realizado com taxa de deslocamento de 1,3 mm/min.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As barras pultrudadas de GFRP e grafeno apresentaram uma média do diâmetro efetivo de 5,39 mm, com uma área efetiva de seção transversal de 22,82 mm², que está de acordo com o Projeto de Norma (PN) 193.001.003 (ABNT/CEE-193, 2024), o qual determina o limite da área efetiva de seção transversal entre 18,5 e 25,4 mm² para barras com diâmetro nominal de 5 mm. Além disso, o compósito possui densidade de 1,94 g/cm³.

Na análise de TGA, conforme apresentado no Gráfico 1, a curva TG apresenta o intervalo do evento entre 183,73 °C a 480,77 °C, com um pico a 420,33 °C, através da derivada primeira da curva TG, a DTG (*Derivative Thermal Gravimetry*), indicando o ponto onde a velocidade de decomposição é máxima. Em 725 °C, foi observada uma massa residual de 9,81 mg, que está associada às fibras de vidro utilizadas como reforço do compósito, representando cerca de 81,39% do teor de fibras do material. Consequentemente, entende-se que aproximadamente 18,61% do compósito é composto pela matriz epóxi.

Gráfico 1: termogramas TG e DTG de barras de GFRP



Fonte: o autor

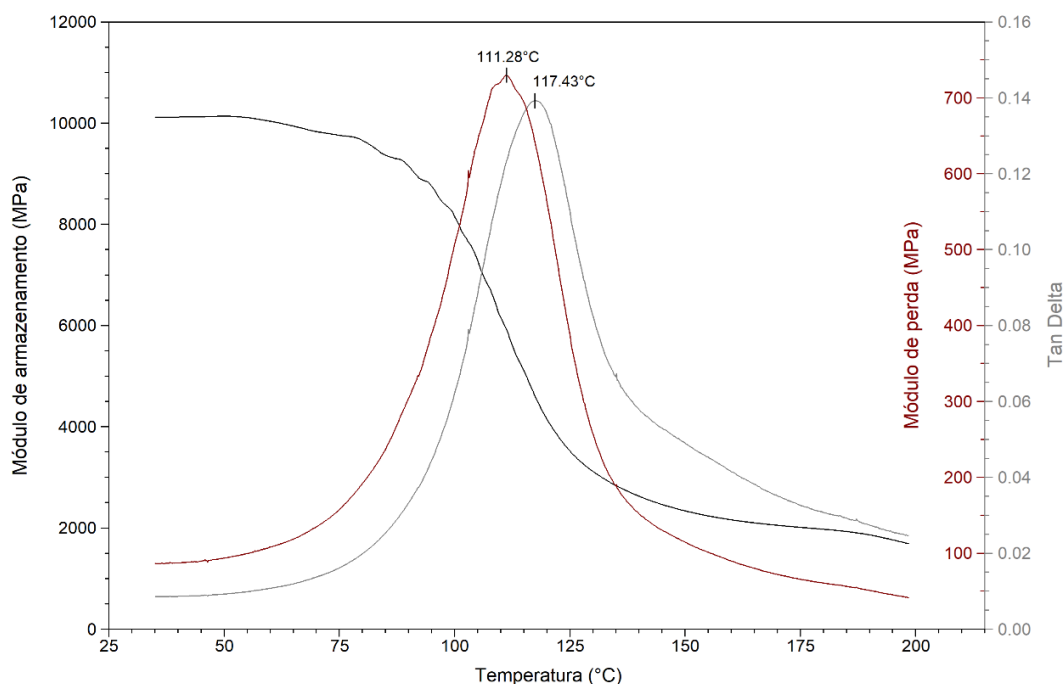
O material compósito de GFRP apresentou uma fração mássica de fibras a 81,10% e o de matriz epóxi e grafeno a 18,90%. Esses resultados corroboram as informações obtidas na análise de TGA. Além disso, o teor de fibras supera o valor mínimo exigido pela norma ASTM D7957-22, que estabelece um mínimo de 70% para o teor de fibras e para o Projeto de Norma (PN) 193.001.003 (ABNT/CEE-193, 2024) que estabelece 75%.

A análise de DSC realizada em uma amostra de barra de GFRP revelou que, durante o processo de aquecimento, a matriz polimérica experimenta uma transição vítrea (T_g) a 113,39 °C para as amostras que contêm matriz epóxi e grafeno. Este valor está de acordo com as expectativas, superando o limite

mínimo de 110,0 °C estabelecido pela norma ASTM D7957-22 e 100 °C para o Projeto de Norma (PN) 193.001.003 (ABNT/CEE-193, 2024), estando de acordo com as duas normativas.

Para validar o resultado da T_g obtida por DSC, foi realizada a análise por DMA, conforme ilustrado no Gráfico 2. Observou-se uma curva de T_g de 111,28 °C, correspondente ao módulo de perda, que representa a parte viscosa do material, ou seja, a energia dissipada na forma de calor. Além disso, a Tan Delta (tangente delta), que é a razão entre o módulo de perda e o módulo de armazenamento, apresentou um valor de 117,43 °C, evidenciando uma temperatura de transição vítrea mais elevada. Esse resultado sugere que o composto de fibras de vidro e resina epóxi com grafeno possui maior capacidade de dissipação de energia. Optou-se por adotar o valor de T_g determinado pelo DMA, porque este método apresenta maior precisão na caracterização da T_g para este tipo de material.

Gráfico 2: curva de T_g de barras de GFRP pelo DMA



Fonte: o autor

A Tabela 1 apresenta os valores de T_g de barras de GFRP relatados por outros autores. A comparação desses valores com os resultados obtidos no presente estudo permite avaliar a consistência dos dados e identificar possíveis

variações decorrentes das diferenças nos processos de fabricação ou na composição dos materiais.

Tabela 1: T_g em barras de GFRP.

Matriz	T_g (°C)	Referência
Epóxi	117,1	(13)
Epóxi	106	(14)
Epóxi	104	(15)

Fonte: o autor

Conforme apresentado na Tabela 2, o ensaio de tração determinou uma tensão de ruptura satisfatória para as barras pultrudadas, com uma média de 904,44 MPa, superior ao valor estabelecido pela norma ASTM D7957-22 (2022), que indica uma tensão máxima de 800 MPa. Esses resultados evidenciam a alta resistência do material sob carga. Além disso, o módulo de elasticidade foi calculado, apresentando uma média de 43,99 GPa, indicando que o material atende ao limite mínimo estabelecido pela norma.

Tabela 2: propriedades mecânicas de barras de GFRP com resina epóxi e grafeno

Corpo de Prova	Tensão de Ruptura (MPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)
1	897,74	40,68
2	882,01	43,78
3	955,27	44,35
4	941,88	46,52
5	845,31	44,61
Média	904,44	43,99
Desvio Padrão	44,80	2,12
Coefficiente de Variação (%)	4,95	4,81

Fonte: o autor

Na Tabela 3, são apresentados os resultados obtidos por autores, os quais investigaram a propriedade mecânica das barras de GFRP. Esses dados fornecem uma base para a comparação com os resultados do presente trabalho, destacando valores semelhantes para tensão de ruptura.

Tabela 3: Propriedades mecânicas de barras de GFRP.

Matriz	Tensão de Ruptura (MPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Referência
Viniléster	1128,3	58,0	(16)
Epóxi	814,16	50,5	(17)
Poliéster	868,7	51,9	(18)
Viniléster	907,4	51,7	
Epóxi	981,7	51,8	
Éster Vinílica	955,8	53,1	(19)
Poliéster	817,6	54,4	

Fonte: o autor

CONCLUSÃO

Os resultados apresentados confirmam o potencial do compósito estudado para ser utilizado em situações que demandam alta resistência e durabilidade, reforçando sua viabilidade como alternativa aos materiais tradicionais. Como sugestão para trabalhos futuros: analisar a resistência das barras de GFRP incorporada ao concreto e realizar um estudo da durabilidade a longo prazo.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar a minha gratidão à empresa VerGraf por contribuir para a realização desta pesquisa e ao Dr. Guilherme Bueno pelo apoio e conhecimento que proporcionou durante todo o desenvolvimento deste trabalho de pesquisa. Também sou grato à equipe do Laboratório de Polímeros (LAPOL/UFRGS) e ao Grupo de Mecânica Aplicada (GMAP/UFRGS) pelo auxílio prestado durante as etapas do programa experimental, além das instituições de fomento CAPES e CNPq.

REFERÊNCIAS

- (1) A. K. Sharma, R. Bhandari, A. Aherwar, and R. Rimašauskiene, "Matrix materials used in composites: A comprehensive study," *Mater. Today Proc.*, vol. 21, pp. 1559–1562, 2020, doi: 10.1016/j.matpr.2019.11.086.
- (2) S. Utekar, S. V K, N. More, and A. Rao, "Comprehensive study of recycling of thermosetting polymer composites – Driving force, challenges and methods," *Compos. Part B Eng.*, vol. 207, no. September 2020, 2021, doi: 10.1016/j.compositesb.2020.108596.

- (3) X. Zhao, X. Wang, Z. Wu, and J. Wu, "Experimental study on effect of resin matrix in basalt fiber reinforced polymer composites under static and fatigue loading," *Constr. Build. Mater.*, vol. 242, p. 118121, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118121.
- (4) V. Chaudhary and F. Ahmad, "A review on plant fiber reinforced thermoset polymers for structural and frictional composites," *Polym. Test.*, vol. 91, no. August, p. 106792, 2020, doi: 10.1016/j.polymertesting.2020.106792.
- (5) T. Bai *et al.*, "Wetting mechanism and interfacial bonding performance of bamboo fiber reinforced epoxy resin composites," *Compos. Sci. Technol.*, vol. 213, no. March, p. 108951, 2021, doi: 10.1016/j.compscitech.2021.108951.
- (6) P. Cousin, M. Hassan, P. V. Vijay, M. Robert, and B. Benmokrane, "Chemical resistance of carbon, basalt, and glass fibers used in FRP reinforcing bars," *J. Compos. Mater.*, vol. 53, no. 26–27, pp. 3651–3670, 2019, doi: 10.1177/0021998319844306.
- (7) J. Thomason, "A review of the analysis and characterisation of polymeric glass fibre sizings," *Polym. Test.*, vol. 85, no. February, p. 106421, 2020, doi: 10.1016/j.polymertesting.2020.106421.
- (8) P. Govindaraj *et al.*, "Distribution states of graphene in polymer nanocomposites: A review," *Compos. Part B Eng.*, vol. 226, no. July, p. 109353, 2021, doi: 10.1016/j.compositesb.2021.109353.
- (9) U. R. Hashim, A. Jumahat, and M. Jawaid, "Mechanical properties of hybrid graphene nanoplatelet-nanosilica filled unidirectional basalt fibre composites," *Nanomaterials*, vol. 11, no. 6, 2021, doi: 10.3390/nano11061468.
- (10) J. I. G. da Silva, "Vergalhões De Gfrp Em Substituição Aos De Aço Na Armadura De Concreto Armado," *Rev. Foco*, vol. 17, no. 3, p. e4705, 2024, doi: 10.54751/revistafoco.v17n3-113.
- (11) T. D'Antino, M. A. Pisani, and C. Poggi, "Fatigue tensile testing of glass fiber-reinforced polymer reinforcing bars," *Constr. Build. Mater.*, vol. 346, no. April, p. 128395, 2022, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2022.128395.
- (12) D. Jia, Q. Guo, J. Mao, J. Lv, and Z. Yang, "Durability of glass fibre-reinforced polymer (GFRP) bars embedded in concrete under various environments. I: Experiments and analysis," *Compos. Struct.*, vol. 234, no.

- November 2019, p. 111687, 2020, doi: 10.1016/j.compstruct.2019.111687.
- (13) R. C. de Araújo Moura, P. R. L. Lima, and D. V. Ribeiro, "Effect of Temperature on Mechanical Behavior of Concrete Reinforced with Different Types of GFRP Bar," *Polymers (Basel)*., vol. 14, no. 17, p. 3437, Aug. 2022, doi: 10.3390/polym14173437.
 - (14) H. El-Hassan, T. El-Maaddawy, A. Al-Sallamin, and A. Al-Saidy, "Performance evaluation and microstructural characterization of GFRP bars in seawater-contaminated concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 147, pp. 66–78, 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.04.135.
 - (15) I. C. Rosa, J. P. Firmo, and J. R. Correia, "Experimental study of the tensile behaviour of GFRP reinforcing bars at elevated temperatures," *Constr. Build. Mater.*, vol. 324, no. January, 2022, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2022.126676.
 - (16) M. Tharreau *et al.*, "Durability of partially cured GFRP reinforcing bars in alkaline environments with or without sustained tensile load," vol. 442, no. July, 2024, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2024.137603.
 - (17) H. Liu *et al.*, "Experimental Study of Dimensional Effects on Tensile Strength of GFRP Bars," 2024.
 - (18) Moura, Ruan Carlos de Araújo. Análise da durabilidade de armaduras poliméricas reforça-das com fibras de vidro submetidas ao ambiente alcalino e a elevadas temperaturas / Ruan Carlos de Araújo Moura. – Salvador, 2021. 146 f.: il. color. Tese (Doutorado – Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal da Bahia. Escola Politécnica, 2021.
 - (19) Bueno, Guilherme Manfredini. Análise experimental e numérica da aderência entre barras poliméricas e o concreto / Guilherme Manfredini Bueno. -- 2023. 225 f. Tese (Doutorado) -- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Porto Alegre, BR-RS, 2023.

CHARACTERIZATION OF PULTRUDED BARS REINFORCED WITH GLASS FIBERS AND GRAPHENE

ABSTRACT

Composite materials are gaining prominence in the construction industry as an alternative to traditional materials. Among them, glass fiber reinforced pultruded bars, known as GFRP (Glass Fiber Reinforced Polymer), stand out for their high tensile strength. In addition, the addition of graphene improves the polymer's properties. The aim of this study was to carry out the physical, thermal and mechanical characterization of GFRP bars made with glass fibres, epoxy resin and graphene. To this end, the density, effective diameter and mass fraction of the GFRP bars were determined, in addition to determining the glass transition temperature (T_g) through DMA (Dynamic Mechanical Analysis). The disclosed material had a diameter of 5.39 mm, an average density of 1.94 g/cm³, a fiber mass content of 81.10%, and a T_g of 111.28 °C. The tensile test showed an average stress of 904.44 MPa, confirming the efficiency of GFRP bars as structural reinforcement in civil construction.

Keywords: GFRP, pultruded bars, nanotechnology